

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СИМУЛИРОВАНИЕ КАТАГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ ПРИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.Г. Калмыков, И.А. Бугаев

*Научный руководитель профессор А.Ю. Бычков*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
г. Москва, Россия*

В настоящее время повышенный интерес нефтяных компаний направлен на поиск и разведку, исследование и добычу нефти из высокоуглеродистых формаций, которые относят к трудноизвлекаемым запасам. Высокоуглеродистые формации обладают неоднородными, изменяющимися по латерали свойствами и сложным строением, что существенно затрудняет поиск и разведку запасов нефти, находящихся в естественных коллекторах, позволяющих разрабатывать залежь стандартным бурением вертикальных скважин. В последние годы всё чаще применяются специальные технологии для разработки таких формаций, в частности, на баженовской свите ведущие нефтяные компании бурят горизонтальные скважины с многостадийным гидроразрывом пласта. Однако для экономической эффективности даже в таком случае необходимо наличие коллекторов нефти с большой ёмкостью.

Другим перспективным направлением поиска технологии добычи из высокоуглеродистых формаций, характеризующихся повышенным содержанием органического вещества, особенно керогена, является изучение третичных методов воздействия на пласт, позволяющих преобразовать кероген в так называемую синтетическую нефть. Такая технология потенциально позволит существенно повысить добычу нефти и снизить роль естественных коллекторов при разработке баженовской свиты. В то же время понимание процессов катагенетического преобразования керогена позволит лучше прогнозировать расположение продуктивных зон для применения стандартных технологий.

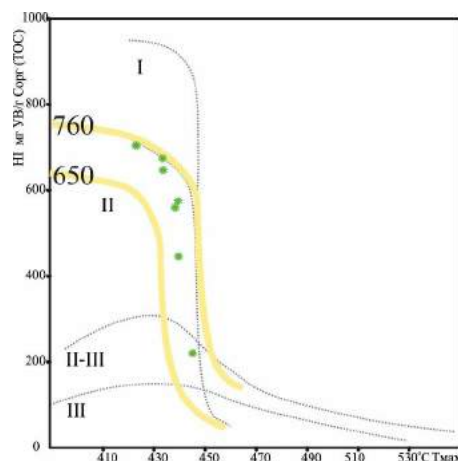
В данной работе катагенетическое преобразование керогена и получение синтетической нефти исследовалось в закрытых системах путём воздействия различными температурами в течение разного времени при пластовом давлении в присутствии воды. Давление создавалось расширением воды в автоклавах при заданных температурах. При этом предварительные эксперименты с использованием тяжёлой воды позволили установить, что она не участвует в процессе синтеза нефти, однако обеспечивает теплопроводность и сохраняет строение и свойства большинства неорганических компонентов породы, тем самым максимально приближая эксперименты к естественным условиям. В то же время порода является активатором и катализатором процесса.

На первом этапе исследования проводили на образцах породы, содержащих непреобразованный кероген (ПКЗ). Было установлено, что при гидротермальном воздействии в течение 10 часов при температурах 300–400°C получается синтетическая нефть в количестве до 12 мас.% от ТОС образца, при этом процент синтетической нефти от реализованного генерационного потенциала (параметр S<sub>2</sub> после экстракции) составляет 20–25%. С повышением температуры большая доля генерационного потенциала реализуется за одно и то же время. Так, за 10 часов при температуре 300°C расходуется около 40% параметра S<sub>2</sub>, а при 400°C – 95%. Пиролитические исследования показали, что кероген из стадии ПКЗ переходит в МК<sub>2</sub>, а затем и в МК<sub>4</sub>.

Поскольку в случае 300°C генерационный потенциал реализован лишь частично, были поставлены эксперименты с большим временем воздействия. Увеличение времени приводит сначала к увеличению количества образующейся синтетической нефти, однако через 5 дней количество нефти начинает постепенно уменьшаться, что обусловлено процессом вторичного крекинга нефтяных продуктов. Стоит отметить, что генерационный потенциал за 7 дней реализуется только на 50–60%. Таким образом, при низких температурах воздействия реализация катагенетического преобразования занимает более длительное время.

В результате проведённых экспериментов по гидротермальному воздействию при различных температурах и длительности прогрева было показано, что кероген можно контролируемо преобразовать до любой стадии катагенеза, которую проходит органическое вещество второго типа при преобразовании в породе за длительное время (Рис.1). При этом полученные результаты хорошо согласуются с расчётами по преобразованию керогена на основании данных кинетических экспериментов по деструкции керогена при пиролизе и вычисленной энергии активации. Таким образом, эксперименты в закрытых системах позволяют симулировать катагенетическое преобразование керогена, оценить процессы, происходящие в нём, и при разработке технологии прогрева пласта в скважине существенно повысить добычу нефти.

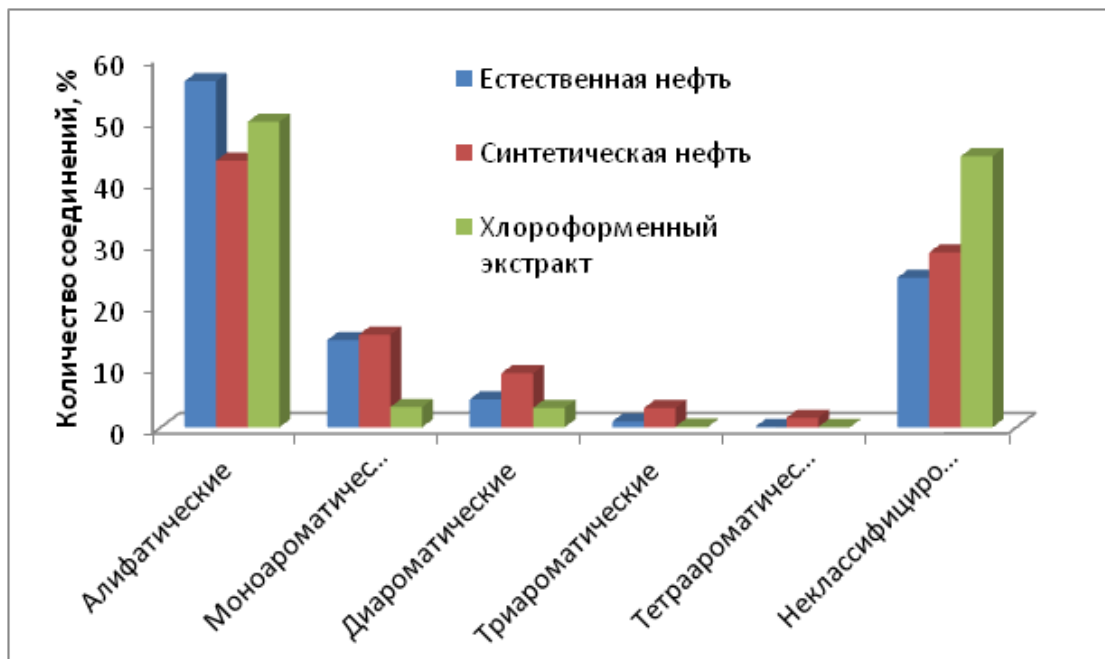
Стоит отметить, что подобранные условия для керогена низкой зрелости (ПКЗ) будут отличаться от условий, необходимых для получения синтетической нефти и преобразования керогена, уже находящегося на других стадиях катагенеза. Так, было установлено, что кероген, находящийся на стадии МК<sub>2</sub> можно также довести до стадии МК<sub>4</sub>, однако для этого понадобятся более высокие температуры (350–400°C), а преобразование при 300°C идёт очень медленно, что хорошо согласуется с экспериментами при той же температуре на непреобразованном керогене, когда не удалось за длительное время достичь стадии МК<sub>3</sub>–МК<sub>4</sub>. В то же время в случае керогена на стадии МК<sub>2</sub> можно большую долю генерационного потенциала перевести в синтетическую нефть (до 35%). Однако, как и в случае экспериментов с породами, в которых кероген находится на стадии ПКЗ, продукты со временем подвергаются вторичному крекингу. При прогреве образца в закрытой системе при 350°C и пластовом давлении в течение 24 часов количество продуктов уменьшается в 3 раза. Таким образом, с точки зрения технологии воздействия на пласт необходимо подбирать условия воздействия для получения максимального выхода синтетической нефти для образцов, находящихся на разной стадии катагенетической преобразованности.



**Рис.1. Модифицированная диаграмма Ван Кревелена изменения зрелости непреобразованного керогена (ПКЗ) после гидротермального воздействия при различных температурах и в течение разного времени**

Для оценки отличия получаемой синтетической нефти от естественной нефти и демонстрации, что данная нефть получается благодаря крекингу керогена а не в результате экстракции сорбированных в породе углеводородов, были проведены эксперименты по сравнению состава естественной и синтетической нефти и экстракта методом хромато-масс-спектрометрии на хроматографе высокой точности Pegasus® HRT 4D–GCxGC–HR TOFMS (LECO). Как видно из полученных результатов (Рис.2), синтетическая нефть содержит гораздо большее количество ароматических соединений. При этом синтетическая нефть по составу ближе к естественной нефти, чем к сорбированным битумоидам. Стоит отметить, что изменение условий воздействия позволяет получать синтетическую нефть различного состава, что представляет большую перспективу для целевой добычи определённых соединений третичными методами.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы. Третичные методы воздействия обладают высокой перспективой для повышения добычи нефти из высокоуглеродистых формаций и получения заданных целевых органических продуктов. Эксперименты по моделированию преобразования достаточно точно позволяют оценить процессы, происходящие в керогене при катагенезе и в сочетании с данными о процессах, происходивших в породах (образование разломов, гидротермальные процессы), могут в будущем повысить точность прогнозов расположения залежей нефти в сложных по строению формациях.



**Рис.2. Различия в составе естественной нефти, синтетической нефти и экстракта из образца баженовской свиты.**

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-00010).